DOI：10.11779/CJGE2020S2019

不规则柱状节理岩体一次成型制备方法试验研究

肖维民[1, 2]，黄 巍[1, 2]，韩俊成[1, 2]，田梦婷[1, 2]

（1. 四川农业大学土木工程学院，四川 都江堰 611830；2. 村镇建设防灾减灾四川省高等学校工程研究中心，四川 都江堰 611830）

摘 要：针对现有不规则柱状节理岩体物理模型试验中存在制样困难、效率低、柱状节理力学响应不好模拟等不足，提出了基于 Voronoi 图随机模拟和 3D 打印技术的模拟不规则柱状节理岩体试件一次成型制备方法，并选用脆性绿蜡作为 3D 打印材料打印不规则柱状节理网络实体模型，制备了圆柱型模拟不规则柱状节理岩体试件。通过对上述试件进行单轴压缩试验，获得了不规则柱状节理岩体试件的单轴抗压强度、变形模量和破坏形态，分析了其力学各向异性规律，总结了其在单轴压缩条件下的典型破坏模式，并将其与现有模型试验结果进行比较，结果表明：上述不规则柱状节理岩体一次成型制备方法在提高制样效率的同时能够较好模拟真实柱状节理的力学响应，具有较好的应用前景。

关键词：岩石力学；不规则柱状节理岩体；3D 打印；单轴压缩试验

中图分类号：TU452 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2020)S2－0106－06

作者简介：肖维民(1983—)，男，副教授，博士，主要从事节理岩体力学和水力学等方面的科研工作。E-mail: sicauxwm@163.com。

Experimental study on one-shot moulding method for preparation of irregular columnar jointed rock mass

XIAO Wei-min[1, 2], HUANG Wei[1, 2], HAN Jun-cheng[1, 2], TIAN Meng-ting[1, 2]

(1. School of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China; 2. Sichuan Higher Education Engineering Research Center for Disaster Prevention and Mitigation of Village Construction, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: In view of the deficiencies of low-efficiency and poor mechanical response of columnar joint existing in the physical model tests on irregular columnar jointed rock mass, a one-shot moulding method for preparing artificial irregular columnar jointed rock mass specimens is proposed based on the Voronoi diagram random simulation and the 3D printing technology. Then brittle green wax is used as the 3D printing material to print the irregular columnar joint network, and the irregular columnar jointed rock mass specimens are prepared. Then uniaxial compression tests are performed on the above specimens, and the uniaxial compressive strength, deformation modulus and failure morphology of the specimens are obtained. On this basis, the mechanical anisotropy characteristics and typical failure modes under uniaxial compression are analyzed. Furthermore, the above experimental results are compared with the existing model test ones. It is shown that the proposed one-shot moulding method can improve the efficiency of sample preparation and simulate the mechanical response of real columnar joints very well.

Key words: rock mechanics; irregular columnar jointed rock mass; 3D printing; uniaxial compression test

0 引 言

柱状节理是发育于火山岩中的一种原生张性破裂构造[1]，它往往将岩石切割成规则六棱柱或其他的不规则棱柱体。柱状节理岩体在我国的赋存范围十分广泛，特别是在西南云贵川地区。早先国内外关于柱状节理岩体的研究热点主要侧重于柱状节理地质成因分析，形成了冷却收缩学说[2]、引张–旋扭成因[3]、双扩散–对流作用[4]以及岩浆热耗散–对流与冷却–收缩分阶段起作用假说[5]等多种成因理论。近年来，随着西南地区水利水电开发的推进，工程中揭露了大量柱状节理岩体，其力学各向异性特性是该类工程中重点关注和亟待解决的关键科学问题。为了研究柱状节理岩体力学各向异性特性，研究人员依托白鹤滩水电站工程，首先采用现场试验和数值模拟方法开展研究，如：卢轶然[6]和张宜虎等[7]选取白鹤滩水电站坝基左岸试验支洞扩挖段布置 6 个试验点，采用 YXSW–12 现场真三轴试验系统对柱状节理岩体试样进行真三轴试验，得到了柱状节理岩体在三向复杂应力条件下的变

基金项目：国家自然科学基金面上项目（41877195，41502242）

收稿日期：2020－08－07

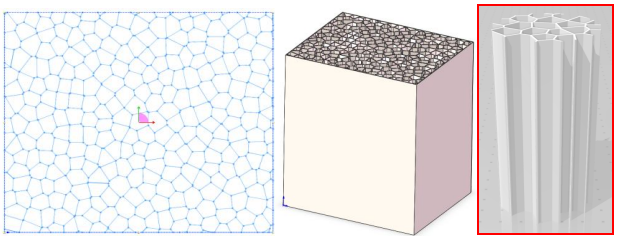
形和强度特征；朱道建等[8]和徐卫亚等[9]分别采用有限差分和离散元数值方法建立了白鹤滩水电站坝基典型柱状节理岩体随机模拟数值模型，分析了坝基柱状节理岩体变形和强度各向异性规律及其对坝基整体应力和变形的影响。但是，由于受到人力物力和时间的限制，现场试验选取的试验点非常有限，所得试验结果具有一定的离散性，而数值试验结果的准确度取决于岩块和柱状节理本构模型能否反映柱状节理岩体实际的力学响应。鉴于此，一部分研究人员在前期勘察调研柱状节理岩体结构特征的基础上，采用水泥或石膏等类岩石材料制备小尺寸模拟柱状节理岩体试件，通过室内单轴或三轴压缩试验研究柱状节理岩体力学各向异性规律[10-15]。尽管目前在柱状节理岩体物理模型试验方面已取得了一定的研究成果，但是所得试验结果与真实柱状节理岩体力学响应还有一定的差异，究其原因在于现有模型试验研究中所采用的制样方法在模拟柱状节理岩体结构特征方面还存在一定的差距。如：刘海宁等[10]、肖维民等[11]、Ji 等[12]、林志南等[13]柯志强等[14]在制作模拟柱状节理岩体试件时均先制备单个柱体，然后采用水泥浆黏结单个柱体形成柱状节理岩体模型，再经切割打磨得到所需圆柱体或棱柱体模拟柱状节理岩体试件，由于水泥浆黏结强度较高且具有一定厚度，因而上述模拟柱状节理岩体试件中的柱状节理与真实柱状节理有一定的差异，柱体间一定厚度的水泥浆对试件强度和变形也有影响；为了克服黏结柱体方法的不足，Lin 等[15]和杨涛等[16]利用3D打印技术采用光敏树脂打印柱状节理网络模型，然后将其预置于圆柱体或棱柱体模具中，再浇筑类岩石模型材料制备模拟柱状节理岩体试件，该方法避免了柱体黏结材料对试件的影响，但是由于光敏树脂本身也具有一定的强度和较好的延性，试验过程中光敏树脂柱状节理网络对试件强度和变形有较大影响。因此采用模型试验方法研究柱状节理岩体力学各向异性特性时，柱状节理的物理模拟方法是关键。

为此，本文在前期研究成果基础上，结合3D打印技术，采用脆性绿蜡材料作为3D打印材料，研究模拟不规则柱状节理岩体试件一次成型制备方法，通过对其进行室内单轴压缩试验获得不规则柱状节理岩体力学各向异性规律及典型破坏特征，并将其与现有柱状节理岩体模型试验研究成果进行比较，验证此方法的可行性。

1　不规则柱状节理岩体试件一次成型制备方法

1.1　不规则柱状节理网络 3D 打印

由于柱状节理岩体现场调查能够获得柱列横截面多边形组合图案，在此采用 Voronoi 图随机模拟柱列横截面多边形组合图案，图中多边形的每一条边即代表一条柱状节理，该方法的可行性已在文献[17]中得到验证。在获得如图 1（a）所示 Voronoi 图随机模拟柱列横截面多边形组合图案后，导入 CAD 软件沿柱列横截面外法线方向拉伸即得到不规则柱状节理三维网络模型（图 1（b）），然后用直径为 5 cm、与柱列水平面成 β 夹角的圆柱面模拟钻芯过程经修整获得直径 5 cm、高度 10 cm 的标准圆柱型柱状节理网络模型（图 1（c）），即为不规则柱状节理网络 3D 打印数字模型。为了分析不规则柱状节理岩体的力学各向异性，在此 β 角取值分别为 0°，15°，30°，45°，60°，75°，90°。



（a）　（b）　（c）

图 1　不规则柱状节理网络模型生成过程

Fig. 1 Generation of irregular columnar joint network

选用绿蜡为打印材料（基本物理参数见表 1），将不规则柱状节理网络 3D 打印数字模型导入 3D 打印机，设置打印壁厚为 0.8 mm，得到具有不同 β 角的圆柱型不规则柱状节理网络实体模型如图 2 所示。

类岩石模型材料采用水灰比为 0.4 的净水泥浆，其基本力学参数汇总如表 2 所示。

表 1　绿蜡基本物理参数

Table1 Physical parameters of green wax

成分	颜色	密度 /(g·cm^{-3})	熔点 /℃	软化点 /℃	打印精度 /mm
石蜡	深绿	0.81	70	52~62	0.025~0.05

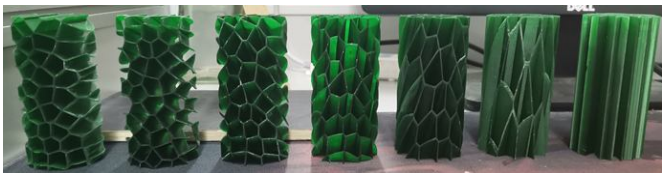


图 2　圆柱型不规则柱状节理网络 3D 打印实体模型

Fig. 2 Solid models for cylindrical irregular columnar joint network

表 2　类岩石模型材料基本力学参数

Table 2 Basic mechanical parameters of rock-like materials

参数	单轴抗压强度 σ_c/MPa	弹性模量 E/GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
数值	25.84	3.516	4.188	35.8°

1.2 不规则柱状节理岩体试件制备过程

模拟不规则柱状节理岩体试件制备过程如下：①在塑料盆中配置水灰比为 0.4 白水泥浆，并振捣消除水泥浆中的气泡；②将不规则柱状节理网络 3D 打印实体模型慢慢浸没在水泥浆中，并轻微摇动模型确保白水泥浆沿柱体方向注入并均匀充满模型（图 3（a））；③将注满白水泥浆的模型套入内径为 5 cm、高为 10 cm 的圆柱形有机玻璃套筒中，然后将套筒连同试样一起取出，用刮刀抹平套筒两端（图 3（b），（c））；④将试样在常温下养护 2 小时后拆除圆柱形套筒，得到模拟不规则柱状节理岩体试件（图 3（d）），再常温养护 28 天备用。

按照上述方法，一共制备 7 组试件用于后续试验。

（a）灌注 （b）圆柱型套筒 （c）常温养护 （d）拆模

图 3 圆柱型模拟不规则柱状节理岩体试件

Fig. 3 Cylindrical artificial columnar jointed rock mass specimens

2 不规则柱状节理岩体单轴压缩试验

2.1 单轴压缩试验方案

模拟不规则柱状节理岩体试件单轴压缩试验在 YZW50 岩石剪切试验系统上进行，具体加载方案如下：①预控制采用轴向力控制，目标值 1 kN，加载速率为 0.05 kN/s，保持 15 s，目的是避免加载初期由于试件与加载压头接触不充分而引起伺服程序不稳定；②设置轴向力目标值为 150 kN，加载速率为 0.1 kN/s，直至试件破坏。

2.2 单轴压缩应力－应变曲线

模拟不规则柱状节理岩体试件单轴压缩应力－应变曲线如图 4 所示，根据试件单轴压缩应力－应变曲线计算相应的单轴抗压强度 σ_r 和变形模量 E_r，得到 7 组模拟不规则柱状节理岩体试件的单轴抗压强度 σ_r 和变形模量 E_r，计算结果汇总于表 3。

表 3 不规则柱状节理岩体试件单轴抗压强度和变形模量汇总

Table 3 Summary of uniaxial compression strength and deformation modulus of irregular columnar jointed rock mass specimens

β/(°)	0	15	30	45	60	75	90
σ_r/MPa	11.812	11.69	9.625	7.374	4.436	7.087	24.087
E_r/GPa	1.031	1.108	0.823	0.393	0.673	0.680	2.275

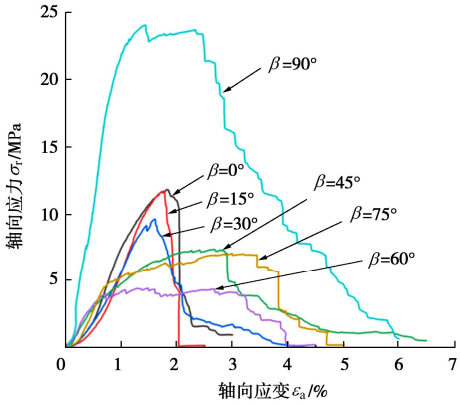


图 4 模拟不规则柱状节理岩体试件单轴压缩应力－应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of artificial irregular columnar jointed rock mass specimens under uniaxial compression

2.3 试件典型破坏模式

通过在模拟不规则柱状节理岩体试件单轴压缩试验过程中进行数字拍照，得到试件破坏发展过程及最终破坏形态如图 5 所示，对其进行归纳总结得到模拟不规则柱状节理岩体试件 3 种典型破坏模式如下。

（1）劈裂–滑移复合破坏

该破坏模式主要发生在倾角 β=0°～15° 时（见图 5（a），（b））。由于试件中柱体近似水平，竖向应力主要作用在柱体侧面及棱线处，随着竖向应力的增加，首先发生垂直柱体轴向和沿柱状节理面的劈裂破坏，当竖向应力进一步增加，柱体沿破坏的柱状节理面产生滑移破坏，最终形成部分通过柱体，部分通过柱状节理面的贯通破坏面。

（2）沿柱状节理面的剪切滑移破坏

该破坏模式主要发生在倾角 β=30°～60° 时（见图 5（c）～（e））。随着竖向应力的增加，试件内部某一柱状节理面上的剪切应力超过其抗剪强度而发生剪切破坏，形成剪切破坏面并随着竖向应力的增加沿着相邻的柱状节理面继续扩展，最终形成沿若干柱状节理面的贯通破坏面，破坏时柱体沿倾角方向有明显的错动位移，试件表现出明显的侧向扩容现象。

（3）沿柱体轴向的压屈–劈裂破坏

该破坏模式主要发生在倾角 β=75°～90° 时（见图 5（f）～（g））。由于试件中柱体近似竖直，试验施加的竖向荷载主要沿柱体轴向作用，且试件中单个柱体长细比较大，外侧柱体首先被压屈而散开，导致柱体破坏由外向试件内部发展，最终导致试件由于大部分柱体沿轴向被劈裂压屈而丧失承载力。

加载前 破坏时试件背面 破坏时试件正面

（a）β=0°

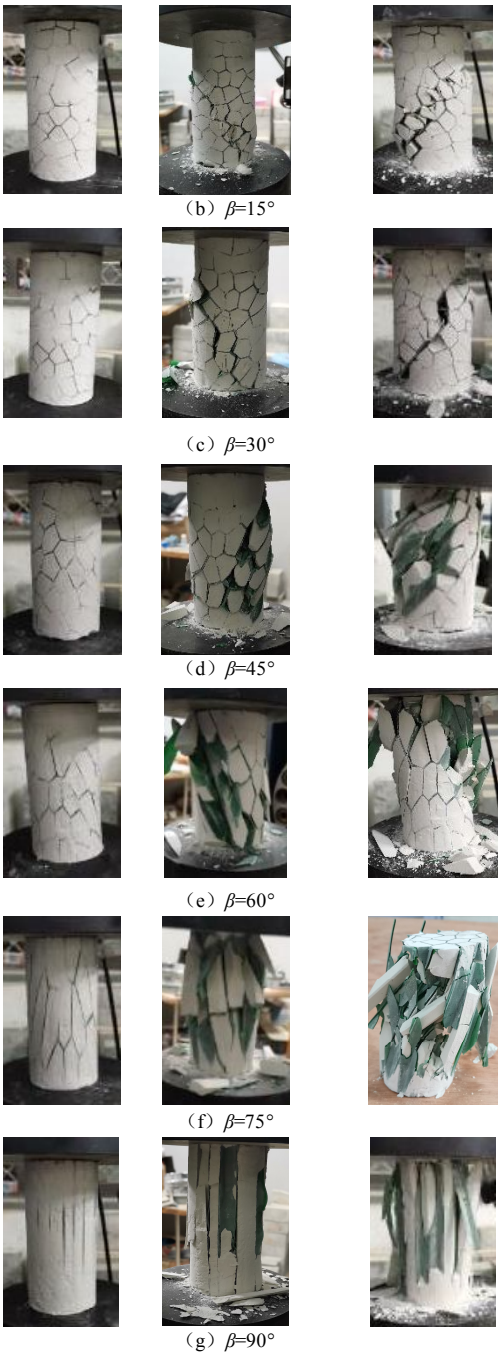


图 5 模拟不规则柱状节理岩体试件典型破坏形态

Fig. 5 Failure modes of artificial irregular columnar jointed rock mass specimens under uniaxial compression

3 结果分析与讨论

3.1 力学各向异性分析

为了分析不规则柱状节理岩体试件的力学各向异性规律，首先将不规则柱状节理岩体试件单轴抗压强度 σ_r 和变形模量E_r分别用类岩石模型材料单轴抗压强度 σ_c 和弹性模量E归一化处理，然后得到其随倾角β的变化规律，如图6所示。同时，为了和现有模型试验结果进行比较，在图6中也列出了采用黏结柱体方法[11-12]和预置光敏树脂柱状节理网络直接浇筑方法[15]所得

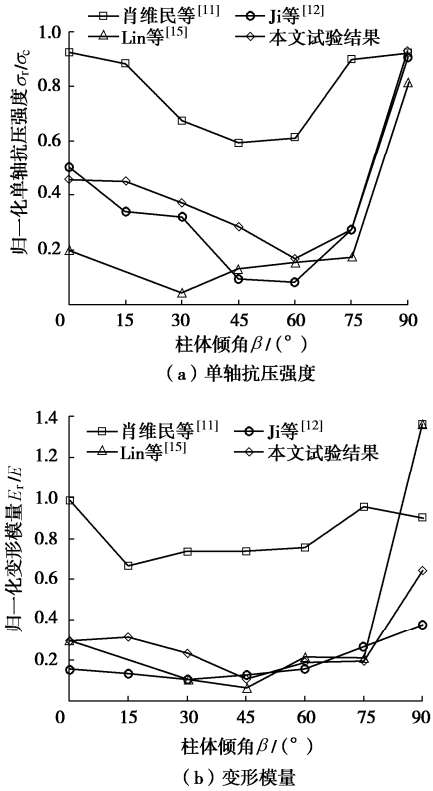


图 6 模拟柱状节理岩体力学各向异性规律比较

Fig. 6 Comparison of mechanical anisotropy of artificial columnar jointed rock mass specimens prepared by different methods

柱状节理岩体力学各向异性试验结果。由图6可知：

（1）当β=0°～75°时，文献[11]所得柱状节理岩体试件归一化单轴抗压强度和变形模量均远大于其他三种方法试验结果，这主要是由于文献[11]采用水泥浆作为柱体黏结剂，水泥浆黏结强度大且柱体间水泥浆厚度较大，从而在提高模拟柱状节理岩体试件强度的同时也约束了柱体沿模拟柱状节理面的滑移变形。

（2）本文所得归一化单轴抗压强度和变形模量随倾角β变化规律近似“U”型分布，呈现较显著各向异性特征，但是β=0°时的试验结果要小于β=90°时的试验结果，这与文献[12]和[15]报道的试验结果是一致的。同时，本文所得归一化单轴抗压强度和变形模量数值在绝大多数倾角下均稍大于文献[12]和[15]结果，仅β=0°时的归一化单轴抗压强度和β=90°时的归一化变形模量出现了突变。

（3）当β=0°时，本文归一化单轴抗压强度小于文献[12]结果，这说明脆性绿蜡柱状节理网络对柱状节理岩体试件强度的影响要小于文献[12]所用的水泥浆；而当β=90°时，文献[15]所得试件归一化变形模量数值远大于本文结果，说明光敏树脂柱状节理网络对试件变形有很大的约束作用。

3.2 典型破坏模式分析

2.3 节归纳总结了一次成型制备的模拟不规则柱状节理岩体试件的 3 种典型破坏模式，现有模型试验结果[11-12, 14-15]也总结了单轴压缩条件下柱状节理岩体的典型破坏模式（如表 4 所示）。通过比较可知：

（1）在水平倾角 β 较小时，由于脆性绿蜡材料本身抗压强度较小，在垂直柱体轴向的竖向应力作用下，绿蜡柱状节理网络对柱体的约束作用较弱，小于光敏树脂和水泥浆黏结层对柱体的约束作用，因此在 β=0°～15°时试件表现为柱体劈裂–柱状节理面剪切滑移复合破坏模式。

表 4 模拟柱状节理岩体单轴压缩典型破坏模式汇总

Table 4 Summary of typical failure modes of artificial columnar jointed rock mass under uniaxial compression

序号	文献出处	柱状节理岩体试件类型	试件典型破坏模式
1	肖维民等[11]	标准圆柱体试件，模型材料为石膏水泥混合材料，黏结剂为水泥浆	①沿柱状节理面的轴向劈裂破坏，β=15°和 30°发生；②形成部分通过节理面、部分通过柱体的复合剪切破坏面，β=0°和 45°发生；③沿柱状节理面的剪切滑移破坏，β=60°和 75°发生；④沿柱体轴向劈裂破坏，β=90°发生。
2	Ji 等[12]	标准圆柱体试件，模型材料为水泥砂浆，黏结剂为白水泥浆	①沿垂直柱轴方向的劈裂破坏，β=0°和 15°发生；②沿柱状节理面的剪切滑移破坏，β=30°～60°发生；③沿柱轴方向的劈裂破坏，β=75°和 90°发生。
3	柯志强等[14]	5 cm×5 cm×10 cm 长方体试件，模型材料为水泥砂浆，黏结剂为白水泥浆	①沿垂直柱轴方向的劈裂破坏，β=0°～30°发生；②沿纵向柱状节理面的剪切滑移破坏，β=45°发生；③劈裂–滑移复合破坏，β=60°发生；④平行柱体轴向的劈裂破坏，β=75°～90°发生。
4	Lin 等[15]	标准圆柱体试件，模型材料为水泥砂浆，预置光敏树脂不规则柱状节理网络	①劈裂破坏，β=0°~30°发生；②沿柱状节理面的剪切滑移破坏，β=75°～90°发生；③劈裂–滑移复合破坏，β=45°～60°发生。

（2）在中等水平倾角和近似竖直情况下，由于本文采用的类岩石模型材料强度远大于绿蜡材料，当竖向应力作用时，绿蜡柱状节理网络先于柱体发生压裂破坏，导致柱体与绿蜡之间的接触面力学特性与真实柱状节理面力学响应更接近，主要表现为柱体沿柱状节理面的剪切滑移更明显，试件在试验后期的侧向变形更明显，而 Lin 等[15]采用光敏树脂作为柱状节理网络打印材料，光敏树脂本身抗压强度和延性都较好，试验过程中模型材料先于柱状节理网络破坏，因此光敏树脂柱状节理网络对试件后期变形有较强的约束作用，从而导致水平倾角较大（β=60°～90°）的试件变形模量比本文大。

综上所述，在此采用脆性绿蜡作为柱状节理网络 3D 打印材料，一次成型制备模拟不规则柱状节理岩体试件用于不规则柱状节理岩体力学各向异性特性研究，一方面提高了不规则柱状节理岩体试件制备效率，同时相比已有研究成果，在模拟柱状节理力学响应方面有了一定的提升，因而该方法是可行的，在后续开展复杂应力状态下不规则柱状节理岩体力学各向异性特性研究中具有巨大的应用前景。

4 结 论

基于 Voronoi 图随机模拟建立圆柱型不规则柱状节理网络 3D 数字模型，采用脆性绿蜡作为 3D 打印材料制备不规则柱状节理网络实体模型，在此基础上研究模拟不规则柱状节理岩体试件一次成型制备方法，并通过试件单轴压缩试验研究不规则柱状节理岩体力学各向异性特性，主要结论如下：

（1）预置绿蜡柱状节理网络的圆柱型不规则柱状节理岩体试件单轴抗压强度和变形模量随倾角 β 变化呈“U”型，表现出显著各向异性特征，与采用水泥浆黏结和预置光敏树脂柱状节理网络等制样方法相比，绿蜡柱状节理网络本身强度更低，对柱体变形的约束作用更弱，与实际柱状节理的力学响应更接近。

（2）单轴压缩条件下预置绿蜡柱状节理网络的圆柱型不规则柱状节理岩体试件典型破坏模式分为三种：在近似水平倾角情况下，试件表现为劈裂–滑移复合破坏；在中等水平倾角情况下，试件表现为沿柱状节理面的剪切滑移破坏；在近似竖直情况下，试件表现为沿柱体轴向的压屈–劈裂破坏。

（3）与现有水泥浆黏结制样方法相比，以脆性绿蜡为打印材料，结合 3D 打印技术的不规则柱状节理岩体试件的一次成型制备方法，在提高制样效率的同时能够较好模拟真实柱状节理的力学响应。

参考文献：

[1] 徐松年. 火山岩柱状节理构造研究[M]. 杭州: 杭州大学出版社, 1995. (XU Song-nian. Study on Columnar Jointing Structure in Volcanic Rocks[M]. Hangzhou: Hanzhou University Press, 1995. (in Chinese))

[2] SPRY A. The origin of columnar jointing, particularly in basalt flows[J]. Journal of Australian Geological Society, 1962, **8**(2):

192－216.

[3] RYAN M P, SAMMIS C G. Cyclic fracture mechanisms in cooling basalt[J]. Geological Society of America Bulletin, 1978, **89**(9): 1295－1308.

[4] KANTHA L H. ‘Basalt fingers’-origin of columnar joints?[J]. Geology Magzine, 1981, **118**(3): 251－264.

[5] 王江海, 吴金平, 王人镜. 福建镇海一带玄武岩柱状节理的动力学研究兼论柱状节理的成因[J]. 岩石学报, 1991(1): 16－25. (WANG Jiang-hai, WU Jin-ping, WANG Ren-jing. Dynamics of columnar joints in basalt, Zhenhai area, Fujian province, with special reference to its genesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 1991(1): 16－25. (in Chinese))

[6] 卢轶然. 柱状节理玄武岩变形各向异性研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2010. (LU Yi-ran. Deformation Anisotropy Study of Columnar Jointed Rock Masses[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2010. (in Chinese))

[7] 张宜虎, 周火明, 钟作武, 等. YXSW-12 现场岩体真三轴试验系统及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(11): 2312－2320. (ZHANG Yi-hu, ZHOU Huo-ming, ZHONG Zuo-wu, et al. In situ rock masses triaxial test system YXSW-12 and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(11): 2312－2320. (in Chinese))

[8] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 柱状节理岩体各向异性特性及尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(7): 1405－1414. (ZHU Dao-jian, YANG Lin-de, CAI Yong-chang. Research on anisotropic characteristics and size effect of columnar jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(7): 1405－1414. (in Chinese))

[9] 徐卫亚, 郑文堂, 宁　宇, 等. 柱状节理坝基岩体三维各向异性数值分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 949－955. (XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang, NING Yu, et al. 3D anisotropic numerical analysis of rock mass with columnar joints for dam foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 949－955. (in Chinese))

[10] 刘海宁, 王俊梅, 王思敬. 白鹤滩柱状节理岩体真三轴模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 1): 163－171. (LIU Hai-ning, WANG Jun-mei, WANG Si-jing. Experimental research of columnar jointed basalt with true triaxial apparatus at Baihetan Hydropower Station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 163－171. (in Chinese))

[11] 肖维民, 邓荣贵, 付小敏, 等. 单轴压缩条件下柱状节理岩体变形与强度各向异性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 957－963. (XIAO Wei-min, DENG Rong-gui, Fu Xiao-min, et al. Model studies on deformation and strength anisotropy of columnar jointed rock masses under uniaxial compression condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 957－963. (in Chinese))

[12] JI H, ZHANG J C, XU W Y, et al. Experimental investigation of the anisotropic mechanical properties of a columnar jointed rock mass: observations from laboratory-based physical modelling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, **50**(7): 1919－1931.

[13] LIN Zhi-nan, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Determination of strength and deformation properties of columnar jointed rock mass using physical model tests[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, **22**(9): 3302－3311.

[14] 柯志强, 王环玲, 徐卫亚, 等. 含横向节理的柱状节理岩体力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(2): 1－8. (KE Zhi-qiang, WANG Huan-ling, XU Wei-ya, et al. Experimental study of mechanical behaviour of artificial columnar jointed rock mass containing transverse joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(2): 1－8. (in Chinese))

[15] LIN Zhi-nan, XU Wei-ya, WANG Huan-ling, et al. Anisotropic characteristic of irregular columnar-jointed rock mass based on physical model test[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, **21**(5): 1728－1734.

[16] 杨　涛, 卢文斌, 阙相成. 柱状节理岩体相似材料力学特性试验研究[J]. 河南科学, 2018, **36**(4): 575－578. (YANG Tao, LU Wen-bin, QUE Xiang-cheng. Experimental study on mechanical properties of similar materials for columnar jointed rock masses[J]. Henan Science, 2018, **36**(4): 575－578. (in Chinese))

[17] 宁　宇, 徐卫亚, 郑文棠, 等. 柱状节理岩体随机模拟及其表征单元体尺度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(6): 1202－1208. (NING Yu, XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang et al. Study of random simulation of columnar jointed rock mass and its representative elementary volume scale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(6): 1202－1208. (in Chinese))

（编校：明经平）